Vol. 15, No. 1, Spring 2026, p. 96-113 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2025.96215.1620 OPEN ACCESS

Investigation of Soil Microbial Community Dynamics across Different Ages of Haloxylon Persicum Plantations in the Arid Ecosystems of Birjand, Eastern Iran

Morteza Saberi [1*], Mohammad Reza Dahmardeh Ghaleno [1], Rasool Khatibi [1], Mehdi Sarparast [2]

[1] Associate Professor, Rangeland and Watershed Management Department, Faculty of Water and Soil, University of Zabol, Zabol, Iran

[2] Department of Desert Areas Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 28 October 2025

Revised: 25 December 2025

Accepted: 27 December 2025

Available Online:

31 December 2025

Keywords:

Soil Organic Carbon (SOC)

Haloxylon Afforestation

Soil Microbial Biomass (SMB)

Arid Ecosystems

Microbial Quotient (Qmic)

ABSTRACT

This paper assessed the influence of Haloxylon Persicum plantation age on soil physical, chemical, and microbial properties in the arid ecosystems of Birjand County, South Khorasan Province, Iran. Soil sampling was conducted at three sites: two planted sites (34 and 26 years old) and one unplanted control site. Physicochemical properties, including Soil Organic Carbon (SOC), Total Nitrogen (TN), available phosphorus and potassium, pH, EC, CaCO3 content, Sodium Adsorption Ratio (SAR), bulk density, and porosity, were measured. Microbial activity, Microbial Biomass Carbon (MBC) and Nitrogen (MBN), basal and substrate-induced respiration (SIR), and catalase enzyme activity were also evaluated. The results showed that with increasing plantation age, SOC and TN increased significantly, while bulk density decreased and porosity increased, indicating an improvement in soil structure, permeability, and ventilation, as well as enhanced microbial activity. Enzyme activity, microbial biomass, and microbial population also increased significantly in older sites, while the C/N ratio and Microbial Quotient (Qmic) remained statistically unchanged, indicating the maintenance of the functional balance of the microbial community. The positive correlation of SOC and TN with microbial indices, alongside the negative correlation of the C/N ratio, bulk density, and CaCO3 content, highlights the importance of physicochemical properties in determining soil health. These results indicate that long-term Haloxylon afforestation enhances soil quality, microbial activity, and the ecological capacity of desert ecosystems, providing a solid foundation for sustainable soil management and dryland restoration.

* Corresponding author: Morteza Saberi E-mail address: mortezasaberi@uoz.ac.ir

How to cite this article: Saberi, M., Dahmardeh Ghaleno, M. R., Khatibi, R., & Sarparast, M. (2026). Investigation of Soil Microbial Community Dynamics across Different Ages of Haloxylon Persicum Plantations in the Arid Ecosystems of Birjand, Eastern Iran. *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(1), 96-113. https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.96215.1620

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Desertification, the most severe form of land degradation in arid and semi-arid regions worldwide, leads to a decline in biodiversity, reduced ecosystem stability, and detrimental alterations in ecosystem structure and function. Vegetation restoration, particularly using resilient native species such as *Haloxylon persicum*, is recognized as a highly effective strategy to combat desertification and restore local habitats. Soil microbial communities play a critical role in maintaining the stability and functionality of these arid ecosystems, especially through their key involvement in carbon and nitrogen cycling. However, comprehensive data on the changes in soil physical, chemical, and microbial properties **across** a gradient of Haloxylon plantation ages remain limited. This is particularly true in arid regions of eastern Iran, such as Birjand, where the long-term influence of native afforestation on soil structure and biological function has yet to be fully elucidated. The present study was designed to investigate the dynamics of the soil microbial community at various plantation ages and analyze their relationships with soil physicochemical properties. Its novelty lies in the integrated, multifaceted assessment of soil properties and microbial communities throughout different stand ages. This approach facilitates a deeper understanding of the plant-soil-microbe interactions and helps identify mechanisms influencing long-term ecosystem restoration. The results are expected to provide practical information for optimizing afforestation schemes, enhancing the resilience of arid ecosystems, and establishing a robust scientific basis for sustainable land restoration strategies.

Material and Methods

To investigate the effect of plantation age on the dynamics of the soil microbial community, this study was conducted in three distinct sites: two plantations aged 34 and 26 years, along with one unplanted control area, in the Merak region of Birjand city (South Khorasan province). Sampling was carried out in June 2025 using a systematic random method, with six sampling points selected as replicates at each site. At each replicate, soil samples were collected from a depth of 0 to 30 cm after removing the surface litter and transported separately to the laboratory. The physicochemical properties of the soil including Soil Organic Carbon (SOC), Total Nitrogen (TN), available phosphorus and potassium, pH, Electrical Conductivity (EC), porosity, bulk density, calcium carbonate content (CaCO3), and Sodium Adsorption Ratio (SAR) were measured. Soil microbial characteristics were assessed using standard methods, including catalase enzyme activity, basal and substrate-induced respiration (SIR), Microbial Biomass Carbon (MBC) and Nitrogen (MBN), and microorganism population (MPN). The Microbial Quotient (Qmic) was calculated as the ratio of MBC to SOC. After verifying normality and homogeneity of variances, the data were analyzed using one-way analysis of variance (ANOVA) within a completely randomized design. Relationships between physicochemical and microbial parameters were examined using Principal Component Analysis (PCA) and Pearson correlation coefficients in R software.

Results and Discussion

The results of this study showed that long-term Haloxylon afforestation significantly affects the physicochemical and microbial properties of soil in the arid ecosystems of the Birjand region. Analysis of variance revealed a significant impact of Haloxylon plantation on indicators such as SOC, TN, available potassium, pH, EC, CaCO3, SAR, bulk density, and porosity, while available phosphorus showed no significant change. Increasing the age of the Haloxylon stand was associated with a significant increase in organic carbon (1.73 to 18.7 g/kg) and more than a fourfold increase in total nitrogen compared to the control site. This indicates the substantial accumulation of organic matter, development of a robust root system, and enhancement of soil microbial activity. The decrease in bulk density and corresponding increase in porosity suggest improvements in soil structure, water permeability, and aeration. Changes in pH, EC, CaCO3, and SAR reflect adjustments in soil salinity and sodicity over time due to plant presence. Regarding microbial properties, catalase enzyme activity, basal and SIR, as well as MBC and MBN, increased significantly with the age of the Haloxylon plantation, indicating enhanced metabolic and

ecological capacity of the soil. Microbial population and diversity improved in older cultivation sites, while the C/N ratio and the Microbial Quotient (Qmic) remained relatively stable, suggesting the maintenance of a functional balance within the microbial community. Positive correlations between SOC and TN with microbial indices, alongside negative correlations of the C/N ratio, bulk density, and CaCO3 content with microbial activity, underscore the importance of these physicochemical indices in determining overall soil health and biological performance. These findings emphasize that long-term Haloxylon afforestation improves soil fertility, promotes microbial activity, and increases the ecological stability of dry ecosystems, playing a key role in soil stabilization and improving its biological performance.

Conclusion

The results of this study showed that long-term Haloxylon afforestation in the arid ecosystems of Birjand has a significant and positive effect on the physical, chemical, and microbial properties of the soil. With increasing stand age, total SOC and TN increased significantly, indicating the substantial accumulation of organic matter from litterfall, root activity, and enhanced microbial turnover. The decrease in bulk density and increase in porosity demonstrate the improvement of soil structure, permeability, and the creation of suitable habitat conditions for microbial growth. Physicochemical changes, including the adjustment of soil salinity and sodicity and the reduction of CaCO3 content and SAR, highlight the positive long-term effects of Haloxylon afforestation on overall soil quality. Microbial indicators such as catalase enzyme activity, basal and SIR, as well as MBC and MBN also increase with the age of the Haloxylon plantation, demonstrating enhanced metabolic and ecological capacity of the soil. The population and diversity of microorganisms in older *Haloxylon persicum* stands improved, while the carbon-to-nitrogen ratio and Qmic remained stable, suggesting the maintenance of functional balance within the microbial community. The positive correlation of SOC and TN with microbial indices and the negative correlation of C/N ratio, bulk density, and CaCO3 with microbial activity highlights the critical role of physicochemical properties in soil health. PCA analysis identified the first axis as the main factor separating the sites, with SOC, TN, and MBC contributing the most to explaining the observed differences. These findings indicate that long-term Haloxylon afforestation enhances soil quality, microbial activity, and the ecological capacity of desert ecosystems, providing valuable insights for sustainable soil management and restoration.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the University of Zabol (Grant code: IR-UOZ-GR-8721) for conducting this research.

جلد ۱۵، شماره ۱، بهار ۱۴۰۵، ص ۱۱۳-۹۶ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

مقاله پژوهشی DOI: 10.22067/GEOEH.2025.96215.1620 دسترسی آزاد

بررسی پویایی جامعه میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری در اکوسیستم‌های خشک بیرجند، شرق ایران

مرتضی صابری[1*]، محمدرضا دهمرده قلعه نو[1]، رسول خطیبی[1]، مهدی سرپرست[2]

[1] گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده آب و خاک، دانشگاه زابل، زابل، ایران
[2] گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۰۶
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۴
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:
کربن آلی خاک (SOC)
تاغ کاری
زیست‌توده میکروبی خاک (SMB)
اکوسیستم‌های خشک
نسبت میکروبی (Qmic)

چکیده

این مطالعه تأثیر سن تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در اکوسیستم‌های خشک شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی را بررسی کرد. نمونه‌برداری خاک در سه سایت با سنین ۳۴ و ۲۶ سال و یک سایت بدون تاغ‌کاری انجام شد. ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی شامل کربن آلی خاک، نیتروژن کل، فسفر و پتاسیم در دسترس، pH، EC، کربنات کلسیم، نسبت جذب سدیم، چگالی ظاهری و تخلخل اندازه‌گیری شد. همچنین فعالیت میکروبی، زیست‌توده کربن و نیتروژن میکروبی، تنفس پایه و برانگیخته و فعالیت آنزیم کاتالاز ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که با افزایش سن تاغ‌کاری، SOC و TN به طور معنی‌داری افزایش یافته و چگالی ظاهری کاهش و تخلخل افزایش یافته است، که نشان‌دهندهٔ بهبود ساختار، نفوذپذیری و تهویهٔ خاک و ارتقای فعالیت میکروبی است. فعالیت آنزیمی، زیست‌تودهٔ میکروبی و جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز در سایت‌های قدیمی‌تر به‌طور چشمگیری افزایش یافت و نسبت C/N و سهم میکروبی تغییر معنی‌داری نداشت، که بیانگر حفظ تعادل عملکردی جامعه میکروبی است. همبستگی مثبت SOC و TN با شاخص‌های میکروبی و همبستگی منفی C/N، چگالی ظاهری و کربنات کلسیم اهمیت ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در تعیین سلامت خاک را نشان داد. این نتایج نشان می‌دهند که تاغ‌کاری بلندمدت موجب ارتقای کیفیت خاک، افزایش فعالیت میکروبی و ظرفیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های بیابانی شده و پایه‌ای مستحکم برای مدیریت پایدار خاک و احیای اراضی خشک فراهم می‌آورد.

*نویسندهٔ مسئول: مرتضی صابری
Email: Mortezasaberi@uoz.ac.ir

مقدمه

سلامت خاک یکی از اجزای اساسی اکوسیستم‌های زمینی است و با ارائه خدمات حیاتی مانند حفظ کیفیت آب، افزایش تولید گیاهی، چرخه عناصر غذایی و تجزیه مواد آلی، نقش مهمی در پایداری محیط دارد (Tahat, Alananbeh, Othman & Leskovar, 2020). این ویژگی‌ها تحت تأثیر خصوصیات زیستی، شیمیایی و فیزیکی خاک و فعالیت میکروارگانیسم‌ها قرار دارند (Sahu, Singh, Prabha, Meena & Abhilash, 2019). تجزیهٔ مواد آلی توسط میکروب‌ها باعث بازیافت عناصر غذایی و بهبود ساختار خاک می‌شود و بدین ترتیب هم حاصلخیزی و هم سلامت اکوسیستم‌های خاکی تقویت می‌شود (Delgado-Baquerizo et al., 2017).

بیابان‌زایی یکی از شدیدترین شکل‌های تخریب اراضی در مناطق خشک جهان است و موجب کاهش تنوع و پایداری اکوسیستم‌ها، تغییر در ساختار خاک و کاهش فعالیت میکروبی می‌شود (Shi et al., 2023). کنترل بیابان‌زایی و احیای اراضی تخریب‌شده یکی از اولویت‌های مدیریت پایدار منابع طبیعی است. احیای پوشش گیاهی، به‌ویژه با استفاده از گونه‌های مقاوم بومی، یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش فرسایش بادی، تثبیت خاک و بهبود عملکرد زیستی خاک به شمار می‌رود (Li, Li, Xie, Chang & Li, 2022). شواهد حاصل از پایش‌های بلندمدت، آزمایش‌های کنترل‌شده و داده‌های سنجش از دور نشان می‌دهند که بازسازی پوشش گیاهی موجب کاهش فرسایش، افزایش زیست‌توده خاک و بهبود کیفیت زیستگاه‌های محلی می‌شود (Li, Xie, Yang & Li, 2022; Chen et al., 2021; Reynolds et al., 2007).

اکوسیستم‌های خشک به دلیل محدودیت منابع آب و شرایط محیطی سخت، حساسیت بالایی نسبت به تغییرات مدیریت خاک و پوشش گیاهی دارند. احیای پوشش گیاهی نه تنها بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک اثر می‌گذارد، بلکه پویایی جوامع میکروبی خاک را نیز تغییر می‌دهد. افزایش ورودی مواد آلی، بهبود ساختار خاک و افزایش منابع غذایی موجب تقویت فعالیت و تنوع میکروارگانیسم‌ها و افزایش ظرفیت خاک برای چرخهٔ عناصر غذایی می‌شود (Reynolds et al., 2007; Li, et al., 2022). همچنین، بازسازی پوشش گیاهی می‌تواند با بهبود ورود و خروج کربن و نیتروژن، محیط مناسبی برای رشد باکتری‌ها و قارچ‌های خاک فراهم کند (Zhou et al., 2020). افزایش کربن و نیتروژن خاک پس از احیای پوشش گیاهی در مناطق مختلف بیابانی مانند فلات تبت، استپ‌های بیابانی و بیابان تنگر به‌طور گسترده گزارش شده است (Gou et al., 2019; Li, et al., 2022; Du et al., 2021). این تغییرات نه تنها تنوع و فعالیت میکروبی خاک را افزایش می‌دهند، بلکه چرخه‌های بیوشیمیایی و بازدهی اکوسیستم را نیز تقویت می‌کنند.

در ایران، به ویژه در مناطق خشک شرق کشور مانند بیرجند، گونهٔ زرد تاغ (*Haloxylon persicum*) به عنوان یک گونه بومی و مقاوم، در طرح‌های تاغ‌کاری و احیای پوشش گیاهی برای کنترل فرسایش و تثبیت خاک استفاده می‌شود. این گونه با داشتن ریشه‌های عمیق و سیستم فتوسنتزی C4 قادر است در شرایط تنش‌زا مانند خشکی و شوری به رشد خود ادامه دهد و با افزایش مواد آلی خاک، زمینه را برای فعالیت جوامع میکروبی فراهم کند (Yang & Lv, 2023). تاج پوشش و ریشه‌های این گونه با ایجاد میکروزیستگاه‌های مناسب و ترشح ترکیبات ریشه‌ای، فعالیت میکروبی خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهند و چرخه‌های بیوشیمیایی و فرآیندهای اکولوژیکی خاک را تقویت می‌کنند (Gomaa, Hegazy & Alhaithloul, 2023; Zhou et al., 2020). جوامع میکروبی خاک مستقیماً بر تجزیه مواد آلی، چرخهٔ عناصر غذایی و پایداری ساختار خاک تأثیر دارند (Zhan, 2024) و تنوع و ساختار جامعه میکروبی می‌تواند شاخصی برای ارزیابی بهبود کیفیت خاک و پایداری اکوسیستم باشد.

سن کاشت و مراحل رشد گیاهان تأثیر مهمی بر پویایی جوامع میکروبی خاک دارند. در مراحل اولیه، تنوع و فعالیت میکروبی محدود است، اما با گذشت زمان و افزایش مواد آلی، فعالیت و تنوع میکروبی افزایش یافته و شرایط اکولوژیکی و پایداری اکوسیستم بهبود می‌یابد (Abdi, Saleh, Majnonian & Deljouei, 2019; Gomaa et al., 2023). مطالعات نشان داده‌اند که سن جنگل‌کاری یا تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک اثر قابل توجهی دارد. برای مثال، چن و همکاران (Chen et al., 2025) گزارش

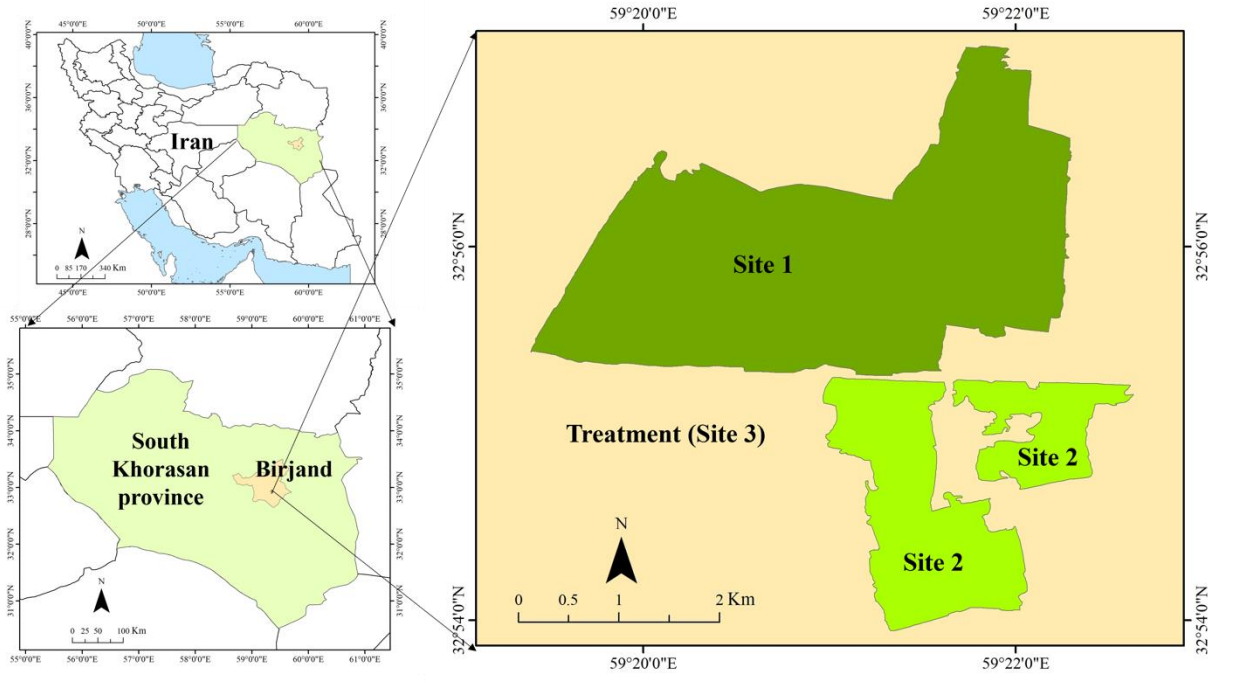
کردند که افزایش سن جنگل‌کاری موجب افزایش محتوای کربن خاک و تمرکز بالاتر کربن در لایه‌های سطحی می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که با گذر زمان، تاغ‌کاری می‌تواند به بهبود پایداری و سلامت اکوسیستم‌های بیابانی کمک کند و پایه علمی محکمی برای مدیریت بلندمدت ارائه نماید.

علاوه بر این، جوامع میکروبی تحت تاج پوشش زرد تاغ در سنین مختلف تغییرات قابل توجهی در ترکیب و تنوع خود دارند، که می‌تواند شاخصی برای ارزیابی اثرات تاغ‌کاری بر اکوسیستم‌های بیابانی باشد (Li et al., 2023; Arokh et al., 2021). ویژگی‌های فیزیولوژیکی و سازوکارهای تحمل خشکی زرد تاغ باعث افزایش کربن آلی و بهبود خواص شیمیایی خاک می‌شوند، به‌گونه‌ای که پس از چند دهه کاشت، شرایط مناسب برای فعالیت میکروارگانیسم‌ها ایجاد شده و ساختار جامعهٔ میکروبی بهبود می‌یابد (Su & Liu, 2020; Lü et al., 2019). این تعاملات گیاه - خاک - میکروب نقش کلیدی در پایداری و بازسازی اکوسیستم‌های بیابانی ایفا می‌کنند و اهمیت بررسی پویایی میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری برای مدیریت پایدار خاک و ارزیابی موفقیت پروژه‌های احیا را آشکار می‌سازد.

با وجود نقش حیاتی جوامع میکروبی در پایداری و عملکرد اکوسیستم‌های خشک و چرخه‌های کربن و نیتروژن، اطلاعات جامع دربارهٔ تغییرات ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک در سنین مختلف تاغ‌کاری محدود است، به‌ویژه در مناطق خشک شرق ایران، مانند منطقهٔ بیرجند، که نقش گونه‌های مقاوم بومی در شکل‌دهی ساختار و عملکرد خاک هنوز به‌طور کامل روشن نشده است. این مطالعه با هدف بررسی پویایی جامعهٔ میکروبی و ارتباط آن با خصوصیات خاک در سنین مختلف زر تاغ طراحی شده است. نوآوری پژوهش در ارزیابی همزمان ویژگی‌های خاک و جامعه میکروبی در طول دوره رشد نهفته است، که به درک بهتر تعاملات گیاه - خاک - میکروب و شناسایی سازوکارهای مؤثر در احیای اکوسیستم کمک کرده و پایه علمی محکمی برای مدیریت پایدار تاغ‌کاری و افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌های خشک فراهم می‌آورد.

منطقهٔ مورد مطالعه

محدودهٔ مورد مطالعه در استان خراسان جنوبی و در شهرستان بیرجند واقع شده است. این ناحیه در فاصله‌ای حدود ۱۰ کیلومتر در جهت شمال‌شرقی شهر بیرجند قرار دارد و از نظر موقعیت جغرافیایی، منطقه بین عرض‌های جغرافیایی ″۳۲°۵۳′۲۴ تا ″۳۲°۵۷′۰۰ شمالی و طول‌های جغرافیایی ″۵۹°۱۹′۱۲ تا ″۵۹°۲۲′۳۷ شرقی گسترده شده است. مساحت سایت تاغ‌کاری شماره یک حدود ۸۲۰ هکتار برآورد شده و مجموع مساحت پهنه‌های مربوط به سایت شماره دو نیز ۳۱۳/۵ هکتار می‌باشد. ارتفاع منطقه بین ۱۶۱۰ تا ۱۸۱۰ متر از سطح دریا متغیر است (شکل ۱). پوشش گیاهی منطقه عمدتاً شامل تاغ (*Haloxylon persicum*) به صورت دست‌کاشت بوده و علاوه بر آن، گونه‌هایی نظیر عجوه (*Salsola arbuscula*)، درمنه (*Artemisia sieberi*) و لاکتوکا (*Lactuca serriola*) نیز به‌صورت پراکنده و محدود در سطح منطقه مشاهده می‌شوند.



شکل۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه در استان و کشور (سایت ۱: تاغکاری ۳۴ ساله، سایت‌های ۲: تاغکاری ۲۶ ساله و سایت ۳: منطقه بدون تاغکاری)

Fig.1. Location of the study area within the province and country (Site 1: 34-year-old Haloxylon plantation; Site 2: 26-year-old Haloxylon plantation; Site 3: non-planted area)

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی تأثیر سن تاغکاری بر پویایی جامعهٔ میکروبی خاک، مطالعهٔ حاضر در سه منطقهٔ تاغکاری با قدمت‌های ۳۴ و ۲۶ سال و یک منطقه شاهد بدون تاغکاری در مجاورت این سایت‌ها در منطقه مرک شهرستان بیرجند (استان خراسان جنوبی) انجام شد. این طراحی به پژوهش امکان می‌دهد تا تغییرات جمعیت، تنوع و فعالیت میکروارگانیسم‌های خاک و ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در طول زمان و سنین مختلف تاغکاری مورد ارزیابی قرار گیرد. عملیات نمونه‌برداری در خردادماه ۱۴۰۴ و به روش تصادفی سیستماتیک صورت گرفت. در هر منطقه، شش نقطه به عنوان تکرار برای نمونه‌برداری خاک در نظر گرفته شد و فاصلهٔ حداقل ۵۰ متر بین نقاط نمونه‌برداری رعایت شد تا اثر متقابل بین نمونه‌ها کاهش یابد. در هر تکرار، نمونه‌ها از عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر پس از کنار زدن پوشش سطحی برداشت گردید. نمونه‌های برداشت‌شده از هر عمق به صورت جداگانه در کیسه‌های پلاستیکی نگهداری و به آزمایشگاه برای اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک منتقل شدند. مشخصه‌های خاک شامل pH خاک به روش عصاره گیری اشباع و pH متر، قابلیت هدایت الکتریکی با عصاره گل اشباع و EC متر، تخلخل به‌صورت غیرمستقیم و از روی چگالی ظاهری و چگالی حقیقی خاک محاسبه شد. چگالی ظاهری با استفاده از روش استوانه حلقه‌ای (Core Method) و چگالی حقیقی با استفاده از روش پیکنومتر (Pycnometer Method) اندازه‌گیری گردید (Chen, Baoyin & Xia, 2022). میزان کربنات کلسیم خاک به روش تیتراسیون، نسبت جذب سدیم با استفاده از عصاره اشباع خاک، کربن آلی خاک و نیتروژن کل به ترتیب با روش اکسیداسیون دی کرومات والکی و بلاک و روش کجلدال (Kamali, Sadeghipour, Souri &Mastinu, 2022) اندازه‌گیری شدند.

ویژگی‌های میکروبی خاک

برای ارزیابی ویژگی‌های میکروبی خاک، از روش‌های استاندارد و مرجع استفاده شد. آنزیم کاتالاز با اضافه کردن هیدروژن پراکسید به وسیله اسپکتروفوتومتر UV با طول موج تقریباً ۲۴۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. تنفس پایه میکروبی با روش تیتراسیون، تنفس برانگیخته به روش انکوباسیون، کربن زیست‌توده میکروبی با استفاده از روش تدخین- استخراج، نیتروژن زیست‌توده میکروبی از طریق روش تدخین با کلروفرم و انکوباسیون اندازه‌گیری شد. جمعیت میکروارگانیسم‌ها با روش بیشترین تعداد احتمالی [1] (MPN) محاسبه شد. همچنین، برای محاسبهٔ سهم میکروبی، نسبت کربن زیست‌توده میکروبی به کربن آلی کل مورد استفاده قرار گرفت (Chen et al., 2022).

تجزیه و تحلیل آماری

پس از انجام آنالیزهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها، آزمون نرمال بودن و همگنی واریانس‌ها انجام شد. با تأیید پیش‌فرض‌های آماری، داده‌ها با استفاده از تجزیه واریانس یک‌طرفه در قالب طرح کاملاً تصادفی تحلیل شدند. روابط بین پارامترهای فیزیکی و شیمیایی و میکروبی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار R مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج و بحث

اثر تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک

نتایج تجزیه واریانس (جدول ۱) نشان داد که تاغ‌کاری اثر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد. تفاوت بین سایت‌های مختلف از نظر کربن آلی، نیتروژن کل، پتاسیم قابل دسترس، pH، EC، کربنات کلسیم، نسبت جذب سدیم، چگالی ظاهری و تخلخل در سطح احتمال یک درصد **($p\leq0.01$)** معنی‌دار بود، در حالی‌که فسفر قابل دسترس تفاوت معنی‌داری نشان نداد. افزایش معنی‌دار کربن آلی و نیتروژن کل در سایت‌های قدیمی‌تر مشاهده شد، که ممکن است ناشی از تجمع مواد آلی و توسعه ریشه‌ها و یا عوامل محیطی باشد (Guo et al., 2024). کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل مشاهده شد که ممکن است با بهبود ساختار خاک و افزایش نفوذپذیری مرتبط باشد (Chen et al., 2025). از سوی دیگر، افزایش EC و نسبت جذب سدیم احتمالاً ناشی از انتقال املاح به سطح خاک در اثر تبخیر بالا و کمبود بارندگی در مناطق خشک است. تغییر معنی‌دار در pH خاک حاکی از تأثیر ترشحات ریشه‌ای و تغییر در فرآیندهای بیوشیمیایی خاک می‌باشد (Li et al., 2022). به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سن تاغ‌کاری، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک بهبود یافته‌اند و ممکن است تاغ‌کاری نقش مهمی در ارتقای پایداری اکوسیستم‌های خشک داشته باشد.

نتایج مقایسه میانگین‌ها (جدول ۲) نشان داد که سن تاغ‌کاری اثر معنی‌داری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک دارد و به طور کلی، با افزایش سن تاغ‌کاری، کیفیت خاک بهبود یافته است. مقدار کربن آلی خاک از ۱/۷۳ گرم بر کیلوگرم در سایت شاهد (بدون تاغ‌کاری) به ۷/۱۸ گرم بر کیلوگرم در سایت ۳۴ ساله افزایش یافت که نشان‌دهندهٔ تجمع مواد آلی حاصل از ریزش برگ، ریشه و بقایای گیاهی در طول زمان و افزایش فعالیت میکروبی خاک است. روند مشابهی در نیتروژن کل مشاهده شد، به طوری که مقدار آن در قدیمی‌ترین سایت بیش از چهار برابر سایت شاهد بود. این امر نشان‌دهندهٔ بهبود چرخهٔ نیتروژن و افزایش حاصل‌خیزی خاک است. پتاسیم قابل‌دسترس در تاغزارهای ۲۶ و ۳۴ ساله نسبت به شاهد افزایش معنی‌داری داشت، در حالی که فسفر قابل‌دسترس تفاوت معنی‌داری بین سنین مختلف نشان نداد، که می‌تواند ناشی از کم‌تحرکی فسفر در خاک‌های آهکی مناطق خشک باشد. با افزایش سن تاغ‌کاری، مقادیر pH و EC افزایش یافت که احتمالاً ناشی از تجمع املاح محلول به دلیل تبخیر بالا و جذب انتخابی یون‌ها توسط ریشه‌ها است. در مقابل، کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم (SAR) کاهش یافتند. این تغییرات ممکن است

1- Most Probable Number

تا حدی ناشی از تاغ‌کاری باشند، اما علاوه بر آن می‌توانند تحت تأثیر عوامل اقلیمی، هیدرولوژیک و سایر شرایط محیطی نیز رخ دهند. بنابراین، تاغ‌کاری ممکن است در درازمدت تغییراتی در وضعیت شوری و سدیمی خاک ایجاد کند. از نظر ویژگی‌های فیزیکی، چگالی ظاهری در سایت‌های قدیمی‌تر به‌طور معنی‌داری کاهش و تخلخل خاک افزایش یافت، که این تغییرات بیانگر بهبود ساختار خاک، افزایش نفوذپذیری و تهویهٔ بهتر در اثر فعالیت ریشه‌ای و افزایش مواد آلی است.

جدول ۱- تجزیهٔ واریانس اثر سایت‌های مختلف تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک

Table 1- Analysis of variance for the effects of different Haloxylon plantation sites on soil physicochemical properties

F	میانگین مربعات Mean Squares	درجه آزادی df		پارامترهای خاک Soil parameters
99.25**	23.38	2	بین گروه‌ها Between Groups	کربن آلی خاک
	0.23	8	درون گروه‌ها Within Groups	Soil organic carbon (g kg^{-1})
15.38**	0.14	2	بین گروه‌ها Between Groups	نیتروژن کل
	0.00	8	درون گروه‌ها Within Groups	Total Nitrogen (g kg^{-1})
453.12**	38163.4	2	بین گروه‌ها Between Groups	پتاسیم در دسترس
	84.22	8	درون گروه‌ها Within Groups	Available Potassium (mg kg^{-1})
1.08 ns	151.8	2	بین گروه‌ها Between Groups	فسفر در دسترس
	139.4	8	درون گروه‌ها Within Groups	Available Phosphorus (mg kg^{-1})
13.23**	0.04	2	بین گروه‌ها Between Groups	اسیدیته
	0.003	8	درون گروه‌ها Within Groups	pH
65.11**	2.02	2	بین گروه‌ها Between Groups	هدایت الکتریکی
	0.03	8	درون گروه‌ها Within Groups	EC (dSm^{-1})
23.89**	21.77	2	بین گروه‌ها Between Groups	کربنات کلسیم
	0.91	8	درون گروه‌ها Within Groups	$CaCo_3$
32.06**	1.71	2	بین گروه‌ها Between Groups	نسبت جذب سدیم
	0.05	8	درون گروه‌ها Within Groups	Sodium Adsorption Ratio
57.57**	0.02	2	بین گروه‌ها Between Groups	چگالی ظاهری
	0.00	8	درون گروه‌ها Within Groups	Bulk Density (gcm^{-3})
20.32**	88.11	2	بین گروه‌ها Between Groups	تخلخل
	4.32	8	درون گروه‌ها Within Groups	Porosity (%)

** ، ns به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم معنی‌داری

**, ns: indicate significance at the 1% probability level and non-significance, respectively.

در مطالعهٔ حاضر، تأثیر سن تاغ‌کاری بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در اکوسیستم‌های خشک بیرجند بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش سن تاغ‌کاری، مقادیر کربن آلی و نیتروژن کل خاک به طور معنی‌داری افزایش یافت، که این امر نشان‌دهندهٔ تجمع مواد آلی ناشی از ریزش برگ، فعالیت ریشه‌ها و بقایای گیاهی و در نتیجه افزایش فعالیت میکروبی خاک است. مطالعات نشان داده‌اند که جنگل‌کاری بلندمدت می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک داشته باشد. این فرآیندها موجب بهبود چرخه نیتروژن و ارتقای حاصل‌خیزی خاک می‌شوند. برای مثال، ژنگ و همکاران (Zheng et al., 2024) گزارش کردند که در جنگل‌های کاشته شده با سن بیش از ۲۰ سال، مقادیر کربن آلی خاک، نیتروژن ، زیست‌توده میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی به طور معنی‌داری افزایش یافته است، که این امر نشان‌دهندهٔ بهبود حاصلخیزی و ظرفیت خاک برای حمایت از جوامع میکروبی است.

همچنین، کاهش چگالی ظاهری و افزایش تخلخل در سایت‌های قدیمی‌تر نشان‌دهندهٔ بهبود ساختار خاک، افزایش نفوذپذیری و تهویهٔ بهتر به واسطهٔ فعالیت ریشه‌ها و تجمع مواد آلی است.

افزایش pH و EC و کاهش کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم (SAR) نیز حاکی از آن است که تاغ‌کاری ممکن است بر کیفیت شوری و سدیمی خاک تأثیر داشته باشد، اگر چه در برخی مناطق خشک، تجمع املاح ناشی از تبخیر بالا همچنان مشاهده می‌شود و افزایش EC لزوماً به معنای بهبود کیفیت خاک نیست بلکه می‌تواند نشانهٔ تشدید شوری باشد. این نتایج با مطالعات مشابه در سایر مناطق خشک همخوانی دارد. برای مثال، در مطالعه‌ای در چین، افزایش سن جنگل‌کاری منجر به افزایش محتوای کربن آلی خاک و غلظت بالاتر کربن در لایه‌های سطحی خاک شد (Guo et al., 2024). همچنین، در مطالعه‌ای دیگر، افزایش سن جنگل‌کاری موجب بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و افزایش کیفیت خاک شد (Yao et al., 2023). در نهایت، مطالعه‌ای در ایالات متحده نشان داد که با افزایش سن جنگل‌کاری، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک به‌طور معنی‌داری بهبود می‌یابند (Yesilonis, Szlavecz, Pouyat, Whigham & Xia, 2016). مشاهده شد که با افزایش سن جنگل‌کاری، محتوای کربن خاک افزایش یافته و لایه‌های سطحی خاک دارای بالاترین غلظت کربن هستند (Chen et al., 2025). این یافته‌ها با نتایج مطالعهٔ حاضر تا حدی هم‌راستا هستند، هرچند تأثیر دقیق تاغ بر این تغییرات نیازمند بررسی بیشتر و در نظر گرفتن عوامل محیطی است.

جدول ۲- مقایسهٔ میانگین اثر سن تاغ‌کاری بر خصوصیات فیزیکی خاک

Table 2- Comparison of the Mean Effect of Haloxylon Plantation Age on Soil Physical Properties

پارامترهای خاک Soil parameters	سن سایت‌های تاغ‌کاری The age of Haloxylon plantation sites		
	۰ سال 0 years	۲۶ سال 26 years	۳۴ سال 34 years
کربن آلی خاک Soil organic carbon (g kg^{-1})	1.73 ± 0.1^{c}	3.42 ± 0.2^{b}	7.18 ± 0.8^{a}
نیتروژن کل Total Nitrogen (g kg^{-1})	0.14 ± 0.02^{c}	0.35 ± 0.06^{b}	0.58 ± 0.1^{a}
پتاسیم در دسترس Available Potassium (mg kg^{-1})	161.3 ± 8.9^{b}	355 ± 12.7^{a}	358.3 ± 3.05^{a}
فسفر در دسترس Available Phosphorus (mg kg^{-1})	2.95 ± 0.15^{a}	3.81 ± 0.14^{a}	3.87 ± 0.14^{a}
اسیدیته pH	7.79 ± 0.06^{b}	7.9 ± 0.02^{a}	8.02 ± 0.07^{a}
هدایت الکتریکی Ec	2.03 ± 0.17^{c}	3.11 ± 0.14^{b}	3.64 ± 0.20^{a}
کربنات کلسیم $CaCo_3$	14.3 ± 0.45^{a}	11.2 ± 0.95^{b}	8.93 ± 1.27^{c}
نسبت جذب سدیم Sodium Adsorption Ratio	3.54 ± 0.20^{a}	2.93 ± 0.15^{b}	2.0 ± 0.30^{c}
چگالی ظاهری Bulk Density (gcm^{-3})	1.37 ± 0.02^{a}	1.28 ± 0.02^{b}	1.20 ± 0.01^{c}
تخلخل Porosity (%)	38.6 ± 2.51^{b}	45.5 ± 2.08^{a}	49.3 ± 1.52^{a}

Different letters in each row indicate a significant difference ($p<0.05$).

اثر تاغ‌کاری بر ویژگی‌های میکروبی خاک

نتایج تجزیهٔ واریانس اثر تاغ‌کاری بر خصوصیات میکروبی خاک نشان داد که سن تاغ‌کاری تأثیر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد ($p<0.01$). فعالیت آنزیم کاتالاز به عنوان شاخصی از پویایی زیستی و پایداری میکروبی، در سایت‌های قدیمی‌تر به طور قابل توجهی افزایش یافت که بیانگر بهبود ظرفیت اکسیداتیو و فعالیت متابولیکی خاک است. همچنین، تنفس پایه و برانگیخته میکروبی به‌طور معنی‌داری افزایش یافتند و نشان‌دهنده‌ی شدت بیشتر فرآیندهای معدنی‌شدن و تجزیه مواد آلی در تاغزارهای مسن‌تر هستند. کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز با افزایش سن تاغ‌کاری رشد قابل‌توجهی داشتند که حاکی از بهبود شرایط زیست‌پذیری و تجمع مواد آلی در خاک است. در مقابل، نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده میکروبی و سهم میکروبی تفاوت معنی‌داری نشان ندادند که بیانگر پایداری نسبی ترکیب و کارکرد جوامع میکروبی است (جدول ۳).

جدول ۳- تجزیهٔ واریانس اثر سایت‌های مختلف تاغ‌کاری بر ویژگی‌های میکروبی خاک

Table 3- Analysis of Variance of the Effect of Different Haloxylon Plantation Sites on Soil Microbial Characteristics

F	میانگین مربعات Mean Squares	درجه آزادی df		پارامترهای خاک Soil parameters
163.4^{**}	48.46	2	Between Groups بین گروه‌ها	انزیم کاتالاز
	0.29	8	Within Groups درون گروه‌ها	Catalase Enzyme
132.0^{**}	2.17	2	Between Groups بین گروه‌ها	تنفس میکروبی پایه
	0.01	8	Within Groups درون گروه‌ها	Basal Microbial Respiration
65.1^{**}	7.10	2	Between Groups بین گروه‌ها	تنفس بر انگیخته
	0.1	8	Within Groups درون گروه‌ها	Basal respiration
205.5^{**}	17655.1	2	Between Groups بین گروه‌ها	کربن زیتوده میکروبی
	85.8	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microbial Biomass Carbon
365.4^{**}	289.9	2	Between Groups بین گروه‌ها	نیتروژن زیتوده میکروبی
	0.79	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microbial Biomass Nitrogen
3.32^{ns}	3.86	2	Between Groups بین گروه‌ها	کربن بر نیتروژن زیتوده میکروبی
	1.16	8	Within Groups درون گروه‌ها	MBC/ MBN
79^{**}	79.0	2	Between Groups بین گروه‌ها	جمعیت میکروارگانیسم‌ها
	1.0	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microorganism Population
4.02^{ns}	117.4	2	Between Groups بین گروه‌ها	سهم میکروبی
	29.2	8	Within Groups درون گروه‌ها	Microbial Quotient

**، ^{ns} به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد و عدم معنی‌داری

**, ^{ns}: indicate significance at the 1% probability level and non-significance, respectively.

نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که سن تاغ‌کاری تأثیر قابل توجهی بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد. فعالیت آنزیم کاتالاز، شاخصی از ظرفیت اکسیداتیو و عملکرد زیستی، با افزایش سن تاغ‌کاری به‌طور معنی‌داری افزایش یافت، که بیانگر تقویت فعالیت متابولیکی و توانایی خاک در تجزیه مواد آلی است. تنفس پایه و تنفس برانگیخته نیز در سایت‌های مسن‌تر به ترتیب بیشترین مقادیر را نشان دادند و نشان‌دهنده افزایش شدت فرآیندهای معدنی‌شدن و گردش عناصر غذایی در خاک هستند. کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز با افزایش سن تاغ‌کاری به طور چشمگیری افزایش یافتند، که نمایانگر بهبود شرایط زیست‌پذیری و تجمع مواد آلی در خاک و تقویت ظرفیت خاک برای حمایت از جوامع میکروبی است. نسبت کربن به نیتروژن زیست‌تودهٔ میکروبی در طول سنین

مختلف تغییر معنی‌داری نشان نداد، که بیانگر حفظ تعادل ترکیبی و عملکردی جامعه میکروبی است. جمعیت میکروارگانیسم‌ها نیز با افزایش سن تاغ‌کاری افزایش چشمگیری داشت، که تأکید بر رشد و توسعه جوامع میکروبی با گذشت زمان دارد. سهم میکروبی نسبت به کربن آلی، با اینکه در سایت‌های مسن‌تر کمی کاهش یافت، اما تغییرات آن معنی‌دار نبود، که نشان‌دهندهٔ پایداری نسبی نقش میکروارگانیسم‌ها در فرآیندهای خاک است. به طور کلی، این نتایج حاکی از آن است که تاغ‌کاری بلندمدت موجب ارتقای سلامت زیستی خاک، افزایش فعالیت میکروبی و تقویت پایداری اکوسیستم‌های بیابانی می‌شود.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد که تاغ‌کاری تأثیر معنی‌داری بر اغلب ویژگی‌های میکروبی خاک دارد و با افزایش سن تاغزار، شاخص‌های زیستی خاک به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابند. این یافته‌ها با نتایج گزارش شده توسط لی و همکاران (Li et al., 2022)، ژان (Zhan, 2024)، دو و همکاران (Du et al., 2021) و یانگ ولو (Yang & Lv, 2023) مطابقت دارد که نشان دادند افزایش سن جنگل‌کاری یا احیای پوشش گیاهی در مناطق خشک موجب بهبود شاخص‌های زیستی و افزایش فعالیت میکروبی خاک می‌شود. مطالعه‌ای در چین نشان داد؛ در جنگل‌های کاشته شده با سن بیش از ۲۰ سال، افزایش معنی‌داری در کربن آلی خاک، نیتروژن، زیست‌تودهٔ میکروبی و فعالیت‌های آنزیمی وجود دارد (Zheng et al., 2024). افزایش فعالیت آنزیم کاتالاز در تاغزارهای مسن‌تر، نشان‌دهندهٔ ارتقای ظرفیت اکسیداتیو و پایداری زیستی خاک است. این آنزیم با خنثی‌سازی پراکسید هیدروژن و تجزیه ترکیبات آلی نقش مهمی در حفظ سلامت میکروبی خاک ایفا می‌کند (Tahat et al., 2020). در تاغزارهای قدیمی‌تر، افزایش بقایای گیاهی، بهبود تهویه و تجمع مواد آلی موجب تحریک سنتز این آنزیم شده است (Yang & Lv, 2023). این موضوع بیانگر آن است که توسعهٔ سیستم ریشه‌ای و ترشحات ریشه‌ای تاغ، بستر مناسبی برای فعالیت میکروارگانیسم‌های هوازی فراهم می‌آورد (Gomaa, Hegazy & Alhaithloul, 2023). افزایش معنی‌دار تنفس پایه و تنفس برانگیخته میکروبی نیز بیانگر رشد فعالیت متابولیکی و شدت بیشتر فرآیندهای معدنی شدن در تاغزارهای مسن‌تر است. این یافته با نتایج مطالعات مشابه در اکوسیستم‌های بازسازی‌شده هم‌خوانی دارد (Yang, Zou, Yang & Lin, 2016; Zhou et al., 2020; Cheng et al., 2013). افزایش تنفس می‌تواند ناشی از افزایش دسترسی به کربن آلی قابل‌تجزیه، افزایش رطوبت خاک و بهبود ساختار خاک باشد (Du et al., 2021). در واقع، توسعه پوشش گیاهی موجب افزایش ورودی مواد آلی از طریق ریزش برگ، ترشحات ریشه و بقایای زیستی شده که محیطی مطلوب برای رشد و فعالیت میکروبی فراهم می‌کند (Li et al., 2022).

افزایش کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی در تاغزارهای مسن‌تر نشان می‌دهد که خاک در طول زمان ظرفیت بیشتری برای حمایت از جوامع میکروبی پیدا می‌کند. این روند احتمالاً ناشی از بهبود وضعیت حاصلخیزی خاک و افزایش ذخیره مواد آلی است که به واسطه توسعه پوشش گیاهی و تجمع بقایای گیاهی ایجاد می‌شود. یافته‌های ما با مطالعه ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2025) همسو است، که در اراضی بازسازی‌شده در چین گزارش کردند بازسازی پوشش گیاهی منجر به افزایش قابل توجه زیست‌توده میکروبی کربن (MBC) و نیتروژن (MBN) شده است. در این مطالعه، افزایش MBC و MBN با بهبود ترکیب شیمیایی خاک، افزایش مواد آلی و تقویت فعالیت میکروبی همزمان بود، که نشان‌دهندهٔ اثرات مثبت بلندمدت بازسازی پوشش گیاهی بر ظرفیت خاک برای حمایت از جوامع میکروبی است. مطالعات مشابه نشان می‌دهند که افزایش سن تاغ‌کاری یا سایر گونه‌های مقاوم به خشکی، شرایط زیست‌محیطی خاک را بهبود می‌بخشد و محیط مناسبی برای رشد میکروب‌های خاکی فراهم می‌آورد (Li et al., 2022; Li, Cao, Chen & Han, 2025). بنابراین، یافته‌های این پژوهش نه تنها با نتایج مطالعه ژنگ و همکاران (Zhang et al., 2025) همخوانی دارد، بلکه نشان می‌دهد که اثرات تاغ‌کاری بلندمدت می‌تواند مشابه روند مشاهده شده در سایر اکوسیستم‌های بازسازی‌شده، منجر به افزایش عملکرد زیستی و ظرفیت اکولوژیکی خاک شود.

رشد همزمان C و N زیست‌توده، بدون تغییر معنی‌دار در نسبتC/N ، بیانگر پایداری ساختاری و عملکردی جامعه میکروبی است. یعنی اگر چه مقدار زیست‌تودهٔ افزایش یافته، اما ترکیب جمعیتی و کارکردی میکروب‌ها متوازن باقی مانده است (Zhan, 2024). چنین ثباتی معمولاً در اکوسیستم‌های در حال بلوغ مشاهده می‌شود که در آن‌ها چرخه‌های بیوژئوشیمیایی به سطح پایدارتری رسیده‌اند.

تحلیل داده‌ها نشان داد که جمعیت میکروارگانیسم‌ها در تاغزارهای مسن‌تر به‌طور چشمگیری توسعه یافته است، که این امر بیانگر بهبود تدریجی زیستگاه میکروبی و افزایش تنوع منابع غذایی است. در مراحل اولیه تاغ‌کاری، محدودیت منابع کربنی و نوسانات رطوبتی موجب کاهش فعالیت میکروبی می‌شود، اما با گذشت زمان و تجمع مواد آلی، شرایط محیطی خاک برای رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها بهبود یافته و جوامع میکروبی فعال‌تر و متنوع‌تر می‌شوند (He et al., 2024). از سوی دیگر، سهم میکروبی نسبت به کربن آلی تغییر معنی‌داری نشان نداد، که احتمالاً بیانگر حفظ تعادل نسبی میان ورودی مواد آلی و مصرف میکروبی آن‌ها در طول زمان است (Du et al., 2021).

جدول ۴- مقایسه میانگین اثر سن تاغ‌کاری بر خصوصیات میکروبی خاک

Table 4- Comparison of the mean effects of Haloxylon plantation age on soil microbial properties

سن سایت‌های تاغ‌کاری The age of Haloxylon plantation sites			پارامترهای خاک Soil parameters
۳۴ سال 34 years	۲۶ سال 26 years	۰ سال 0 years	
11.76±0.55[a]	7.46±0.60[b]	3.37±0.47[c]	آنزیم کاتالاز Catalase Enzyme (µmol $KmnO_4$ g^{-1} dry soil)
2.16±0.19[a]	1.09±0.10[b]	0.48±0.02[c]	تنفس میکروبی پایه Basal Microbial Respiration (mg CO_2-C g^{-1} soil day^{-1})
4.38±0.38[a]	2.40±0.41[b]	1.34±0.07[c]	تنفس بر انگیخته Basal respiration (mg CO_2-C g^{-1} soil day^{-1})
226.3±6.42[a]	154.3±11.5[b]	73.0±9.16[c]	کربن زیتوده میکروبی Microbial Biomass Carbon (mg kg^{-1})
26.45±1.1[a]	14.76±1.0[b]	6.93±0.35[c]	نیتروژن زیتوده میکروبی Microbial Biomass Nitrogen (mg kg^{-1})
8.59±0.15[a]	10.45±0.11[a]	10.59±1.8[a]	کربن بر نیتروژن زیتوده میکروبی MBC/ MBN (mg kg^{-1})
14.0±0.98[a]	7.0±1.0[b]	4.0±1.02[c]	جمعیت میکروارگانیسم‌ها Microorganism Population (CFU $\times 10^7$ g^{-1}dry soil)
31.8±4.25[a]	42.8±2.28[a]	42.4±4.31[a]	سهم میکروبی Microbial Quotient (mgCmicg^{-1}Corg)

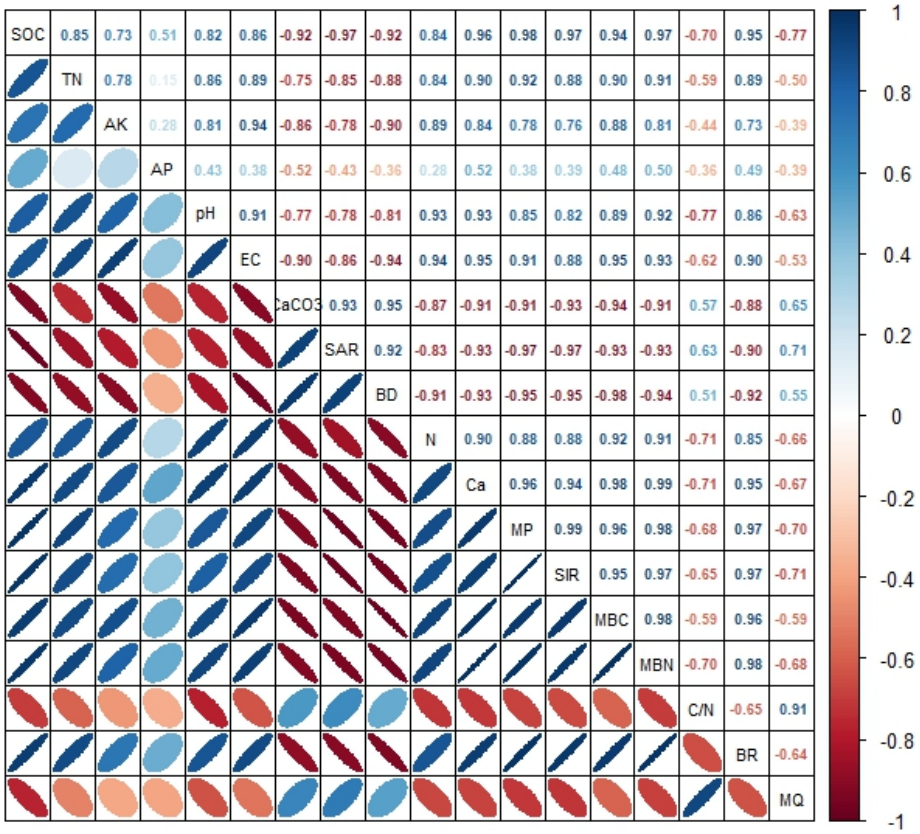
Different letters in each row indicate a significant difference ($p<0.05$).

همبستگی ویژگی‌های خاک

نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، به‌ویژه کربن آلی خاک (SOC) و نیتروژن کل (TN)، نقش محوری در پشتیبانی از فعالیت و تنوع میکروبی دارند (شکل ۲). همبستگی مثبت قوی بین SOC و TN با شاخص‌هایی مانند پتاسیم در دسترس (AK)، کربن زیست‌توده میکروبی (MBC) و نیتروژن زیست‌توده میکروبی (MBN) بیانگر آن است که افزایش ذخایر مواد آلی و عناصر غذایی خاک موجب تقویت ظرفیت اکولوژیکی و فعالیت متابولیکی میکروارگانیسم‌ها می‌شود. این یافته با نتایج گزارش‌شده همخوانی دارد، که نشان دادند افزایش SOC و TN، در اکوسیستم‌های بازسازی شده موجب رشد جمعیت و فعالیت میکروبی می‌شود (Li et al., 2022; Zhang et al., 2025). در مقابل، کربنات کلسیم ($CaCO_3$)، نسبت جذب سدیم (SAR) و چگالی

ظاهری خاک (BD) با اکثر شاخص‌های میکروبی همبستگی منفی داشتند، که نشان دهندهٔ محدودیت‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در کنترل فعالیت میکروبی است. که با نتایج لی و همکاران (Li, Ma & Zhang, 2002) مطابقت دارد.

نسبت کربن به نیتروژن زیست‌توده میکروبی (C/N) در مطالعهٔ حاضر با اکثر شاخص‌های میکروبی و شیمیایی خاک همبستگی منفی نشان داد، که بیانگر کاهش کارایی تجزیه میکروبی با افزایش این نسبت است. مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که C/N با فعالیت و تنوع میکروبی رابطه معکوس دارد. به طور نمونه، باستیدا و همکاران (Bastida et al., 2021) گزارش کردند که افزایش C/N در خاک‌های با محتوای بالای کربن موجب کاهش کارایی تجزیه و زیست‌توده میکروبی می‌شود. یافته‌های مطالعه حاضر با این نتایج همسو است و نشان می‌دهد که در تاغزارهای مسن‌تر، نسبت بالای C/N می‌تواند فعالیت میکروبی و سلامت خاک را به طور نسبی محدود کند. شاخص‌هایی مانند تنفس پایه (BR) و سهم میکروبی (MQ) نیز روابط مثبت و منفی متفاوتی با SOC، TN و MBC/MBN نشان دادند، که پیچیدگی تعاملات بین کیفیت خاک و فعالیت میکروبی را برجسته می‌کند.



شکل ۲– نقشهٔ حرارتی همبستگی پیرسون بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی (SOC: کربن آلی خاک، NT: نیتروژن کل، AK: پتاسیم قابل جذب، AP: فسفر قابل جذب، pH: اسیدیته، Ec: هدایت الکتریکی، $Caco_3$: کربنات کلسیم، SAR: سدیم قابل جذب، BD: چگالی ظاهری، N: تخلخل) و میکروبی خاک (Ca: آنزیم کاتالاز، MP: تنفس میکروبی، SIR: تنفس برانگیخته، MBC: کربن زینوده میکروبی، MBN: نیتروژن زینوده میکروبی، C/N: کربن به نیتروژن زیتوده میکروبی، BR: جمعیت میکروارگانیسم‌ها، MQ: سهم میکروبی)

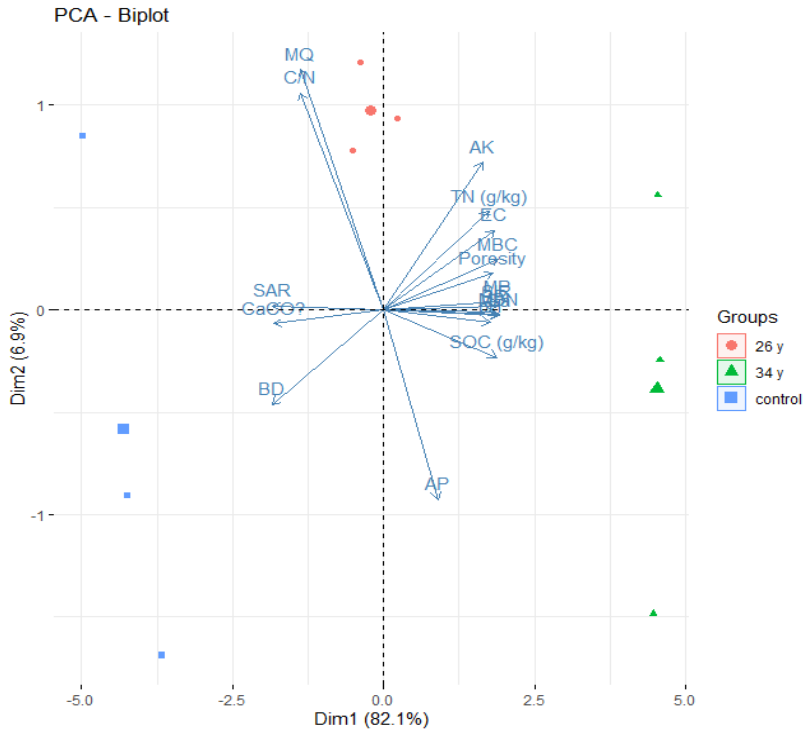
Fig.2. Pearson correlation heatmap between soil physicochemical properties (SOC: soil organic carbon, TN: total nitrogen, AK: available potassium, AP: available phosphorus, pH: acidity, EC: electrical conductivity, $CaCO_3$: calcium carbonate, SAR: sodium adsorption ratio, BD: bulk density, N: porosity) and soil microbial properties (Ca: catalase enzyme activity, MP: basal microbial respiration, SIR: substrate-induced respiration, MBC: microbial biomass carbon, MBN: microbial biomass nitrogen, C/N: microbial biomass carbon-to-nitrogen ratio, BR: microbial population abundance, MQ: microbial quotient).

نتایج PCA نیز نشان داد که محور اول، بیشترین سهم (۸۲/۰۶ درصد) را در توضیح تغییرات داده‌ها دارد و توانست منطقه بدون تاغ‌کاری و با تاغ‌کاری با سنین متفاوت را کاملاً از یکدیگر تفکیک کند، در حالی که محور دوم، با ۶/۸۷ درصد از واریانس کل، تغییرات جزئی‌تر را نشان داد (جدول ۵). جهت‌گیری متغیرهایی مانندکربن آلی خاک (SOC)، نیتروژن کل (TN)، کربن به نیتروژن زیست توده میکروبی (C/N)، کربن زیست توده میکروبی (MBC) و تخلخل (Porosity) به سمت سایت ۳۴ ساله، نشان‌دهندهٔ همبستگی مثبت این ویژگی‌ها با سن تاغ‌کاری و نقش آن‌ها در ارتقای سلامت خاک است، در حالی که ویژگی‌هایی مانند چگالی ظاهری (BD) و فسفر قابل جذب (AP) جهت مخالف محور داشتند و با سایت بدون تاغ‌کاری همبستگی منفی نشان دادند (شکل ۳). طول بردارها نیز نشان‌دهندهٔ قدرت متغیرها در تفکیک نمونه‌ها بود؛ بنابراین کربن آلی خاک، نیتروژن کل و کربن زیست‌توده میکروبی، بیشترین اثر را در توضیح تفاوت‌های بین سایت‌ها داشتند. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که PCA ابزاری مؤثر برای شناسایی متغیرهای کلیدی خاک است؛ به عنوان مثال، عبدل و همکاران (Abdel-Fattah et al., 2021) گزارش کردند که کربن آلی خاک، نیتروژن کل و کربن زیست توده میکروبی بیشترین بار عاملی را در محور اول دارند. این نتایج با یافته‌های حاضر، که نشان‌دهندهٔ همبستگی مثبت این ویژگی‌ها با سن تاغ‌کاری است، مطابقت دارد.

جدول ۵- نتایج تجزیه به مؤلفه‌های اصلی بر ویژگی‌های خاک

Table 5- Results of Principal Component Analysis (PCA) on Soil Properties

محور **Axis**	مقدار شاخص ارزش ویژه **Eigen Value**	درصد واریانس **Percent of Variance**
1	14.77	82.06
2	1.23	6.87



شکل ۳- پراکنش متغییرهای خاک در تجزیه به مولفه‌های اصلی (PCA)

Fig.3. Distribution of soil variables in the principal component analysis (PCA)

نتیجه‌گیری

نتایج مطالعهٔ حاضر نشان داد که تاغ‌کاری بلندمدت در اکوسیستم‌های خشک بیرجند تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی خاک دارد. با افزایش سن تاغ‌کاری، کربن آلی و نیتروژن کل خاک افزایش یافت، چگالی ظاهری کاهش و تخلخل افزایش یافت که بیانگر بهبود ساختار، نفوذپذیری و تهویه خاک و افزایش فعالیت میکروبی است. تغییرات فیزیکوشیمیایی شامل تعدیل شوری و کاهش کربنات کلسیم و نسبت جذب سدیم بود، که اثرات مثبت بلندمدت تاغ‌کاری بر کیفیت خاک را نشان می‌دهد.

شاخص‌های میکروبی مانند فعالیت آنزیم کاتالاز، تنفس پایه و برانگیخته، کربن و نیتروژن زیست‌توده میکروبی نیز با افزایش سن تاغ‌کاری افزایش یافتند، در حالی که نسبت C/N زیست‌توده میکروبی و سهم میکروبی تغییر معنی‌داری نداشت و تعادل عملکردی جامعه میکروبی حفظ شد. همبستگی بین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های میکروبی اهمیت کیفیت خاک در تعیین سلامت و عملکرد اکوسیستم را تأکید می‌کند. تحلیل PCA نشان داد که SOC، TN و MBC بیشترین سهم را در توضیح تفاوت‌ها دارند، که با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد (Abdel-Fattah et al., 2021; Zhang et al., 2025).

به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهند که اجرای طولانی‌مدت تاغ‌کاری می‌تواند به بهبود کیفیت فیزیکی و شیمیایی خاک، تقویت فعالیت میکروبی و ظرفیت اکولوژیکی اکوسیستم‌های بیابانی، تثبیت خاک و ارتقای حاصلخیزی منجر شود. تلفیق داده‌های فیزیکی، شیمیایی و میکروبی نیز اطلاعات کاربردی ارزشمندی برای مدیریت پایدار خاک و برنامه‌ریزی احیای اراضی خشک فراهم می‌آورد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

Abdel-Fattah, M. K., Mohamed, E. S., Wagdi, E. M., Shahin, S. A., Aldosari, A. A., Lasaponara, R., & Alnaimy, M. A. (2021). Quantitative evaluation of soil quality using Principal Component Analysis: The case study of El-Fayoum depression Egypt. *Sustainability*, *13*(4), 1824. https://doi.org/10.3390/su13041824

Abdi, E., Saleh, H. R., Majnonian, B., & Deljouei, A. (2019). Soil fixation and erosion control by Haloxylon persicum roots in arid lands, Iran. *Journal of Arid Land*, *11*(1), 86-96. https://doi.org/10.1007/s40333-018-0021-2

Arokh, M., Nikbakhat, R., Dehghani, R., Rabbani, D., Miranzadeh, M. B., & Moosavi, G. A. (2021). Investigating the environmental status of Haloxylon plantations in Aran va Bidgol deserts (Isfahan-Iran). *International Archives of Health Sciences*, *8*(1), 31–36. https://iahsj.kaums.ac.ir/article_174248.html

Bastida, F., Eldridge, D. J., García, C., Kenny Png, G., Bardgett, R. D., & Delgado-Baquerizo, M. (2021). Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. *The ISME Journal*, *15*(7), 2081-2091. https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0

Chen, H., Zhang, Z., Yang, X., Ai, X., Wang, Y., & Liu, P. (2025). Effects of forest age and stand density on the growth, soil moisture content, and soil carbon content of Populus simoni plantations in the sandy area of western Liaoning, Northeast China. *Scientific Reports*, *15*(1), 2499. https://doi.org/10.1038/s41598-025-86215-4

Chen, L., Baoyin, T., & Xia, F. (2022). Grassland management strategies influence soil C, N, and P sequestration through shifting plant community composition in semi-arid grasslands of northern China. *Journal of Ecological Indicator*, *34*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108470

Chen, Y., Huang, X., Huang, J., Liu, S., Lu, D., & Zhao, S. (2021). Fractional Monitoring of Desert Vegetation Degradation, Recovery, and Greening Using Optimized Multi-Endmembers Spectral Mixture Analysis in a Dryland Basin of Northwest China. *GIScience & Remote Sensing*, *58*(2), 300–321. https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1883940

Cheng, F., Peng, X., Zhao, P., Yuan, J., Zhong, C., Cheng, Y., ... & Zhang, S. (2013). Soil microbial biomass, basal respiration, and enzyme activity of main forest types in the Qinling Mountains. *PLoS ONE, 8*(6), e67353. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067353

Delgado-Baquerizo, M., Trivedi, P., Trivedi, C., Eldridge, D., Reich, P., Jeffries, T., & Singh, B. (2017). Microbial richness and composition independently drive soil multifunctionality. *Functional Ecology, 31*, 2330–2343. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12924

Du, L., Zeng, Y., Ma, L., Qiao, C., Wu, H., Su. Z., & Bao, G. (2021). Effects of Anthropogenic Revegetation on the Water and Carbon Cycles of a Desert Steppe Ecosystem. *Agricultural & Forest Meteorology, 300*, 108339. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108339

Gomaa, N. H., Hegazy, A. K., & Alhaithloul, H. A. S. (2023). Facilitation by *Haloxylon persicum* shrubs enhances density and richness of soil seed bank of annual plants in a hyper-arid ecosystem. *Plants*, *12*(6), 1276. https://doi.org/10.3390/plants12061276

Gou, X., Hu, J., Chen, Y., Wei, X., Du, Z., & Zhou, Q. (2019). The effect of artificial vegetation recovery on the soil nutrients and enzyme activities in subhumid desert land on the southeast Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Ecological Engineering*, *139*, 105528. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.06.023

Guo, X., Yang, G., Wu, J., Qiao, S., & Tao, L. (2024). Impacts of forest age on soil characteristics and fertility quality of Populus simonii shelter forest at the southern edge of the Horqin Sandy Land, China. *PeerJ*, *12*, e17512. https://doi.org/10.7717/peerj.17512

He, B., Li, Q., Zou, S., Bai, X., Li, W., & Chen, Y. (2024). Dynamic changes of soil microbial communities during the afforestation of Pinus armandii in a karst region of Southwest China. *Microbial Ecology*, *87*(1), 36. https://doi.org/10.1007/s00248-024-02345-8

Kamali, N., Sadeghipour, A., Souri, M., & Mastinu, M. (2022). Variations in soil biological and biochemical indicators under different grazing intensities and seasonal changes. *Land, 11*, 1537. https://doi.org/10.3390/land11091537

Li, C. H., Ma, B. L., & Zhang, T. Q. (2002). Soil bulk density effects on soil microbial populations and enzyme activities during the growth of maize (Zea mays L.) planted in large pots under field exposure. *Canadian Journal of soil Science*, *82*(2), 147-154. https://doi.org/10.4141/S01-026

Li, C., Li, Y., Tang, L., Ikenaga, M., Liu, R., & Xu, G. (2023). Soil microbial community shifts explain habitat heterogeneity in two Haloxylon species from a nutrient perspective. *Ecology and Evolution*, *13*(1), e9727. https://doi.org/10.1002/ece3.9727

Li, X., Li, Y., Xie, T., Chang, Z., & X, Li. (2022). Recovery of Soil Carbon and Nitrogen Stocks Following Afforestation with Xerophytic Shrubs in the Tengger Desert, North China. *Catena, 214*, 106277. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106277

Li, Y., Cao, W., Chen, Y., & Han, L. (2025). Responses of soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry to afforestation of severely desertified land in northern China. *Ecological Indicators*, *175*, 113520. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113520

Li, Y., Xie, T., Yang, H., & Li, X. (2022). Revegetation enhances soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity in the Tengger Desert, North China. *Catena*, *218*, 106541. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106541

Lü, X. P., Gao, H. J., Zhang, L., Wang, Y. P., Shao, K. Z., Zhao, Q., & Zhang, J. L. (2019). Dynamic responses of Haloxylon ammodendron to various degrees of simulated drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, *139*, 121-131. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.03.019

Reynolds, J. F., Smith, D. M. S., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P., ... & Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, *316*(5826), 847-851. https://doi.org/10.1126/science.1131634

Sahu, P., Singh, D., Prabha, R., Meena K., & Abhilash, P. (2019). Connecting microbial capabilities with the soil and plant health: options for agricultural sustainability. *Ecological Indicators, 105*, 601-612. https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2018.05.084

Shi, H., Luo, G., Hellwich, O., He, X., Kurban, A., De Maeyer, P., & Van de Voorde, T. (2023). Global dryland aridity changes indicated by atmospheric, hydrological, and vegetation observations at meteorological stations. *Hydrology and Earth System Sciences*, *27*(24), 4551-4562. https://doi.org/10.5194/hess-27-4551-2023

Su, Y., & Liu, T. (2020). Soil evolution processes following establishment of artificial sandy-fixing *Haloxylon ammodendron* forest. *Acta Pedologica Sinica*, *57*(1), 84–91. https://doi.org/10.11766/trxb201812290592

Tahat, M., Alananbeh K., Othman Y., and Leskovar D., (2020). Soil health and sustainable agriculture. *Sustainability*, *12*(12), 4859. https://doi.org/10.3390/su12124859

Yang, F., & Lv, G. (2023). Metabolomic Analysis of the Response of *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to Drought. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(10), 9099. https://doi.org/10.3390/ijms24109099

Yang, N., Zou, D., Yang, M., & Lin, Z. (2016). Variations in soil microbial biomass carbon and soil dissolved organic carbon in the re-vegetation of hilly slopes with purple soil. *PLoS ONE*, *11*(12), e0166536. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166536

Yao, W., Nan, F., Li, Y., Li, Y., Liang, P., & Zhao, C. (2023). Effects of different afforestation years on soil properties and quality. *Forests*, *14*(2), 329. https://doi.org/10.3390/f14020329

Yesilonis, I., Szlavecz, K., Pouyat, R., Whigham, D., & Xia, L. (2016). Historical land use and stand age effects on forest soil properties in the Mid-Atlantic US. *Forest Ecology and Management, 370*, 83–92. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.046

Zhan, C. (2024). Microbial decomposition and soil health: Mechanisms and ecological implications. *Molecular Soil Biology, 15*, 1–10. https://doi.org/10.5376/msb.2024.15.0007

Zhang, L., Wang, H., Guo, J., Lin, W., Hui, D., Zhong, X., ... & Chen, J. (2025). Forestation of abandoned and farmed lands enhances soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus compared to grassed and forested lands: A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, *62*(9), 2296-2305. https://doi.org/10.1111/1365-2664.70109

Zheng, Y., Ye, J., Pei, J., Fang, C., Li, D., Ke, W., ... & Peñuelas, J. (2024). Initial soil condition, stand age, and aridity alter the pathways for modifying the soil carbon under afforestation. *Science of The Total Environment*, *946*, 174448. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174448

Zhou, Y., Li, X., Gao, Y., He, M., Wang, M., Wang, Y., ... & Li, Y. (2020). Carbon fluxes response of an artificial sand-binding vegetation system to rainfall variation during the growing season in the Tengger Desert. *Journal of Environmental Management*, *266*, 110556. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110556